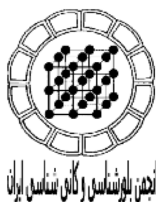
مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران

سال بیست و سوم، شمارهٔ دوم، تابستان ۹۴، از صفحهٔ ۳۵۹ تا ۳۷۲



ساخت و بررسی خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی نانوذرات هگزافریت استرانسیوم نوع M

سید ابراهیم موسوی قهفرخی*، شهاب حسینی، مرتضی زرگر شوشتری

گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانش
۲ ۰گاه شهید چمران اهواز

(دریافت مقاله: ۹۳/۱/۱۶ ، نسخه نهایی: ۹۳/۵/۲۵)

چکیده: در این مقاله، نانوذرات هگزافریت استرانسیوم نوع M ($SrFe_{12}O_{19}$) به روش سل- ژل احتراقی تهیه شدند. برای به‌دست آوردن دمای پخت بهینه، از آنالیز توزین گرمایی (DTA/TG) استفاده شد. براساس نتایج به‌دست آمده از این آنالیز، ژل خشک پودری هگزافریت استرانسیوم در دماهای ۷۵۰°C تا ۱۰۵۰°C و در زمان‌های پخت ۴ تا ۷ ساعت پخت صورت گرفت. خواص ساختاری و ریخت‌شناسی نمونه‌ها به وسیله‌ی طیف پراش پرتو ایکس (XRD)، طیف فروسرخ- تبدیل فوریه (FT- IR) و میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی شدند. همچنین خواص مغناطیسی و دی‌الکتریک نمونه‌ها، به وسیله‌ی مغناطیس ارتعاشی (VSM) و دستگاه LCR متر، در دمای اتاق اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مغناطیسی نمونه‌ها نشان می‌دهد که در پذیرفتاری مغناطیسی هر نمونه، تنها یک قله وجود داشت که با نتایج به دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، مبنی بر تک‌فاز بودن نمونه‌ها همخوانی داشت. همچنین اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریکی نمونه‌ها نشان می‌دهد که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک نمونه‌ها کاهش می‌یابد. که این روند کاهش نشان دهنده‌ی رفتار طبیعی فریت‌هاست. نتایج XRD نشان داد که نمونه‌ی با دما و زمان پخت حدود ۹۵۰°C و ۴ ساعت تک‌فاز است. طیف FT- IR نشان داد که وجود قله‌های جذبی در گستره‌ی cm^{-1} ۵۸۰ - ۵۶۰ و cm^{-1} ۴۷۰ -۴۳۰ در همه‌ی نمونه‌ها، به‌ترتیب بیانگر تشکیل خوشه‌های چهاروجهی و هشت‌وجهی اکسیدهای فلزی در فریت‌ها هستند. همچنین اندازه‌ی نانوذرات بر اساس تصاویر SEM در حدود ۷۰ نانومتر است.

واژه‌های کلیدی: *هگزافریت استرانسیوم؛ نانوذرات؛ روش سل-ژل احتراقی؛ خواص مغناطیسی؛ خواص دی‌الکتریکی.*

مقدمه

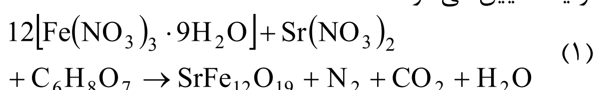
پژوهش‌های علمی روی فریت‌های مغناطیسی، از اواسط قرن ۱۹ آغاز شد. پس از آن، و در سال ۱۹۴۸ آن پژوهش‌ها به‌طور جدی توسط دو دانشمند ژاپنی در راستای کاربردی کردن آن‌ها دنبال شد. در آن سال، نظریه‌ای توسط دو پژوهنده‌ی به نام‌های استونر و ولفارس، تأثیر زیادی در پیشرفت‌های بعدی تولید هگزافریت نوع M به‌وجود آورد. اولین فریت سخت از نوع M با فرمول شیمیایی $BaO.6Fe_2O_3$، در سال ۱۹۵۲ توسط ونت و تقریباً به‌طور هم‌زمان توسط فحلنبراخ و هیسلر، ساخته شد. فریت‌های شش‌گوش نوع M، دارای فرمول عمومی $MO.6Fe_2O_3$، بوده که (M= Ba, Sr, Pb) است. این فریت‌ها، وابسته به گروه فضایی ($P6_3/mmc$) بوده و دارای ساختار مغناطوپلمبیت هستند. ساختار فریت‌های شش‌گوش نوع M، شبیه به ساختار بلوری سنگ معدنی مغناطوپلمبیت $PbFe_{7.5}Mn_{3.5}Al_{0.5}Ti_{0.5}O_{19}$ است [۱،۲]. سلول واحد مغناطوپلمبیت ($MFe_{12}O_{19}$) شامل دو واحد فرمولی با ۶۴ یون

*نویسنده مسئول، تلفن-نمابر: ۰۶۱۳- ۳۳۳۱۰۴۰، پست الکترونیکی: Musavi_ebrahim@yahoo.co.uk

در واحد سلول، در ۱۱ جایگاه متقارن مختلف است و حاوی ۱۰ لایه‌ی اکسیژنی تنگ‌پکیده است که به‌طور شش‌گوشی در راستای محور c قرار گرفته‌اند. یون دوظرفیتی M^{2+}، در هر پنجمین لایه، جانشین یک اتم اکسیژن می‌شود. آنیون‌های اکسیژن، جایگاه‌های ششگوشی و یون‌های فلزی کوچک‌تر، فضای بین آن‌ها را اشغال می‌کنند. جایگاه‌های بین اکسیژنی دو نوعند: یکی چهار وجهی (A)، که در این جایگاه یون فلزی به وسیله چهار یون اکسیژن و هشت وجهی (B) که در این جایگاه یون فلزی به وسیله‌ی هشت یون اکسیژن احاطه شده است. [۳، ۴]. بنابر نظریه فری‌مغناطیس، مغناطش در فریت از گشتاور مغناطیسی خالص یون‌های با اسپین بالا و اسپین پایین در جایگاه‌های مختلف زیرشبکه ناشی می‌شود. بنابراین، مغناطش اشباع یک فریت را می‌توان در دمای صفر کلوین با داشتن گشتاور مغناطیسی هر یون، توزیع یون‌ها بین جایگاه-های A و B، و برهم‌کنش تبادلی بین جایگاه‌های A و B به دست آورد. مغناطش اشباع و دمای کوری به‌ترتیب Ba ،Sr و Pb، کوچک‌تر می‌شود. نیروی وادارنده‌ی مغناطیسی (H_c) هگزافریت‌ها بیشتر به اندازه‌ی ذره وابسته است. H_c هگزافریت‌های نوع M خالص، خیلی بزرگ بوده و وادارندگی مغناطیسی در هگزافریت‌های نوع M با افزایش دما (تا دمایی بیشتر از دمای اتاق)، برخلاف مواد آهن‌ربای شناخته شده‌ی دیگر، افزایش می‌یابد. بنابراین، این مواد نسبت به مواد دیگر برای کاربردهای دمای بالا مناسب‌اند. ثابت دی‌الکتریک (ε) یک ماده، تعیین‌کننده‌ی سرعت نسبی سیگنال الکترومغناطیسی است که می‌تواند در آن ماده حرکت کند. وقتی‌که میکروامواج وارد یک ماده‌ی دی‌الکتریک می‌شوند، سرعت آن‌ها با ریشه دوم ثابت دی‌الکتریک (ε) کاهش می‌یابد که می‌توان این کاهش را با مدل ماکسول- ویگنر توضیح داد. بنابراین مدل، ساختار دی‌الکتریک فریت‌ها شامل دو لایه است، لایه‌ی اول شامل تعداد زیادی دانه است که به‌عنوان لایه‌ی رسانشی در بسامدهای بالا فعالیت می‌کنند. لایه‌ی دیگر شامل مرزدانه‌هایی است که به‌عنوان محیط مقاومتی، در بسامدهای پایین فعالیت می‌کنند. [۵-۸]. بنابر نظریه‌ی رابین‌کینو نوویکاوا، قطبش در فریت‌ها دارای سازوکاری شبیه فرایند رسانش الکتریکی است که به‌واسطه‌ی تبادل الکترون بین یون-های Fe^{+2} و Fe^{+3} است. با افزایش بسامد میدان الکتریکی اعمالی، قطبش کاهش یافته و به یک مقدار ثابت می‌رسد. از آن‌جا که زیر یک بسامد خاص میدان الکتریکی خارجی، تبادل الکترونی بین Fe^{+2} و Fe^{+3} نمی‌تواند از میدان متناوب پیروی کند بنابراین، هر سه کمیت ثابت دی‌الکتریک (ε)، فاکتور اتلاف دی‌الکتریک ($\tan\delta$) و اتلاف دی‌الکتریک نمونه ($\varepsilon'' = \varepsilon' \tan\delta$)، کاهش می‌یابند. علت این کاهش، تهی-جاها، دررفتگی‌ها، ناخالصی‌ها و ناراستی‌های ساختاری است. ثابت‌های دی‌الکتریک بالا، به‌واسطه‌ی افزایش اثر پوسته، باعث کاهش عمق نفوذ امواج الکترومغناطیس می‌شود. فریت‌ها، به-علت کوچک بودن ثابت‌های دی‌الکتریک‌شان، در بسامدهای بالا کاربرد دارند. یکی از مهم‌ترین مواد در گروه فریت‌های ششگوش، فریت استرانسیوم ششگوشی ($SrFe_{12}O_{19}$) است که اولین بار در سال ۱۹۳۸ میلادی توسط آدلسکولد به‌روش هم-رسوبی گرمایی از محلول‌های نیترات، تهیه شد [۹-۱۳]. در این مقاله، به‌منظور تعیین دما و زمان بازپخت بهینه برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز، نخست نمونه‌هایی با دماهای بازپخت مختلف و سپس نمونه‌هایی با زمان‌های بازپخت متفاوت تهیه شدند و خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفتند.

چگونگی بررسی و اندازه‌گیری‌ها

برای ساخت نانوذرات $SrFe_{12}O_{19}$ به روش سل- ژل احتراقی، عنصرسنجی مواد اولیه با استفاده از واکنش شیمیایی رابطه‌ی (۱)، با معلوم بودن مقادیر جرم مولی و نسبت‌های مولی مواد اولیه، تعیین می‌شود [۱۴].



$$12\left[Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O\right] + Sr(NO_3)_2 + C_6H_8O_7 \rightarrow SrFe_{12}O_{19} + N_2 + CO_2 + H_2O \quad (۱)$$

نخست نیترات آهن ۹ آبه‌ی $Fe(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ و نیترات استرانسیوم $Sr(NO_3)_2$ را با نسبت مولی ۱۱ به ۱، در ۱۲۰ml آب دوبار یونیده حل کرده و سپس محلول به‌دست-آمده در حمام آب، به‌منظور گرما دادن غیر مستقیم برای تشکیل ژل، قرار می‌گیرد. برای همگن ساختن، محلول را روی همزن مغناطیسی در دمای ۳۰°C قرار داده و پس از آن‌که مواد اولیه به‌طور کامل حل شدند، اسید سیتریک ($C_6H_8O_7$) با نسبت مولی ۱ به ۱/۵ به محلول اضافه می‌شود. برای این‌که محلول اسیدی در محیطی خنثی به ژل تبدیل شود، از بازی که توانایی اکسایش مواد اولیه مورد نظر را داشته باشد استفاده می‌شود. از آن‌جاکه آمونیاک ($NH_3 \cdot H_2O$) برای واکنش-هایی که بین نیترات‌ها و اسید سیتریک صورت می‌گیرد باز

مناسبی است، بنابراین با اضافه کردن تدریجی آمونیاک، مقدار pH محلول روی عدد ۷ تنظیم شد. این محلول در حمام آب ۱۰۰°C قرار گرفت تا ژلی با چسبندگی بالا شکل بگیرد. ژل حاصل را تا دمای ۳۰۰°C درون کوره خشک کرده که حین خشک شدن، احتراق صورت می‌گیرد. شاخصه‌های ساختاری نمونه‌های تهیه شده در دمای ۹۰۰ °C در زمان‌های ۶ و ۷ ساعت و در دمای۹۵۰°C با زمان‌های ۴، ۵ و ۶، از قبیل پارامترهای شبکه (a, c)، حجم سلول واحد، چگالی نمونه بر مبنای داده‌های پرتو ایکس، اندازه‌گیری بلورک‌ها با استفاده از رابطه‌ی دبای- شرر و درصد فازهای موجود، با استفاده از داده-های الگوی پراش پرتو ایکس مدل PW1840 ساخت شرکت فیلیپس با طول موج ۱٫۵۴ =λ و رابطه‌های مرجع [۴] مشخص شدند. برای بررسی ریزساختار نمونه‌ها، از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل S- 4160/Hitachi استفاده شد. برای شناسایی نوع گروه‌های عامل و پیوندهای موجود در نمونه‌های تهیه شده، از طیف‌سنج فروسرخ- تبدیل فوریه (FT– IR) مدل BOMEN/MB102 در گستره‌ی عدد موج cm^{-1}۴۰۰۰ –۴۰۰ استفاده شد. برای بررسی رفتار مغناطیسی نمونه‌ها، از یک مغناطیس نمونه ارتعاشی (VSM) و خواص دی‌الکتریکی مختلف از قبیل ثابت دی‌الکتریک (ε')، سازه‌ی اتلاف دی‌الکتریک ($\tan\delta$)، اتلاف دی‌الکتریک ($\varepsilon'' = \varepsilon' \tan\delta$)، رسانندگی الکتریکی ac (σ_{ac})، نفوذپذیری مغناطیسی (μ) و ضریب القای مغناطیسی سیم‌پیچ (L) با استفاده از داده‌های به‌دست آمده به وسیله دستگاه LCR متر، در دمای اتاق در گستره فرکانسی ۱۲Hz تا ۰٫۲MHz اندازه‌گیری می‌شوند، استفاده شد.

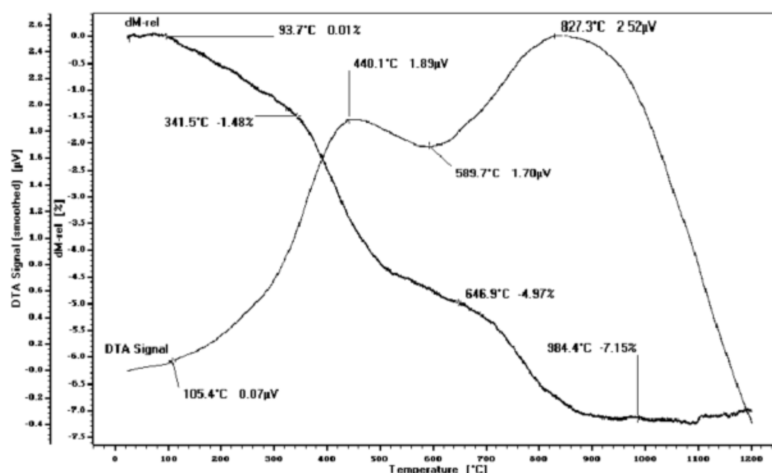
بحث و برداشت

برای ارزیابی سازوکار انتقال فاز ژل خشک و تشکیل فاز هگزافریت، لازم است تا دماهای گرمازا-گرماگیر، چگونگی تجزیه در اثر گرما، کاهش وزن ماده و اثر گرما بر تغییرات ساختاری نمونه‌های ساخته شده صورت گیرد [۱۵]. شکل ۱ نمودار (DTA/TG) خاکستر حاصل از سوختن را نشان می-دهد. بررسی توزین گرمایی (TG) و تفاضلی گرمایی (DTA) با استفاده از ۲۰mg ژل خشک افروخته‌ی هگزافریت استرانسیوم، در فشار جو و با نرخ گرمایش $\frac{°C}{min}$ ۱۰، در گستره دمای ۵۰ تا ۱۲۰۰ °C، از DTA/TG مدل $STA-503/Bahr 2010$ استفاده شد. طی بررسی گرمایش نمونه، چندین فرآیند از قبیل آب‌زدایی، تجزیه، سوختن و متراکم شدن ذرات رخ می‌دهند. بنابر شکل ۱، در منحنی DTA دو قله‌ی گرماگیر و در منحنی TG چهار کاهش وزن مشاهده می‌شوند. کاهش وزن اولیه‌ای که در منحنی TG در گستره‌ی دمایی ۹۴ تا ۳۴۱°C مشاهده می‌شود، به‌علت خروج اکسیژن و رطوبت جذب شده است. مرحله‌ی دوم در منحنی TG کاهش وزن در گستره‌ی دمایی ۳۴۱ تا ۶۵۰°C مشاهده می‌شود که حاصل تجزیه‌ی اسید سیتریک و تجزیه کامل نیترات و ترکیبات آن‌هاست، و خروج گاز CO_2 در حدود ۵ درصد است. از ۶۵۰ تا ۸۸۰°C تشکیل فاز هماتیت ($\alpha-Fe_2O_3$) و آغاز تشکیل فاز هگزافریت استرانسیوم است. در منحنی TG پس از دمای در حدود ۸۸۰°C، کاهش وزنی مشاهده نمی‌شود که احتمالاً به تشکیل مونوفریت استرانسیم، حذف هماتیت، و تشکیل فاز هگزافریت استرانسیوم است. قله‌ی گرماگیر اول در منحنی DTA در دمای۴۴۰°C و قله گرماگیر دوم در دمای ۸۲۷°C مشاهده می‌شود. با بررسی نتایج حاصل از آنالیز توزین گرمایی دماهای ۸۰۰، ۸۵۰، ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰°C به‌منظور تعیین دمای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز انتخاب شدند.

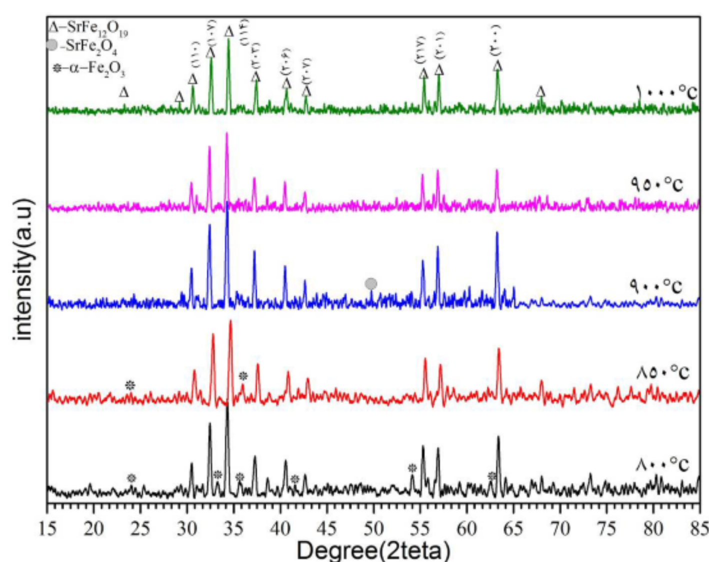
شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بازپخت شده در دماهای۸۵۰،۸۰۰، ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰°C را نشان می‌دهد. زمان بازپخت همه نمونه‌ها ۵ ساعت است. در الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ی بازپخت شده در دمای۸۰۰°C (شکل ۲الف)، قله‌های پراش متناظر با مقادیر 2θی ۳۳٫۲۸، ۳۵٫۷۴، ۴۰٫۹۷، ۵۴٫۲۳ مربوط به‌فاز هماتیت ($\alpha-Fe_2O_3$) مشاهده می‌شوند که نشان می‌دهد، این نمونه دارای مقدار قابل توجهی فاز هماتیت باقی مانده است. هم‌چنین شدت کم و پهنای قله‌های مربوط به هگزافریت استرانسیوم در این نمونه، نشان می‌دهد که در دمای ۸۰۰°C هگزافریت استرانسیوم به‌طور کامل تشکیل نشده است. در الگوی پراش نمونه کلسینه شده در دمای ۸۵۰°C، فقط دو قله‌ی ضعیف مربوط به‌فاز هماتیت مشاهده می‌شوند که نشان‌دهنده‌ی کاهش درصد فاز هماتیت‌اند. در الگوی پراش نمونه‌ی کلسینه شده در دمای ۹۰۰°C قله‌های وابسته به‌فاز هماتیت به‌طور کامل حذف شده‌اند و در $2\theta =$ ۴۹٫۲۷ قله‌ای مشاهده می‌شود که مربوط به‌فاز واسطه مونوفریت استرانسیم ($SrFe_2O_4$) است. این قله در دماهای ۹۵۰°C و ۱۰۰۰°C مشاهده نمی‌شود. الگوی پراش نمونه‌ی کلسینه شده در دمای ۹۵۰ و ۱۰۰۰°C، تشکیل هگزافریت

استرانسیوم را نشان می‌دهد. شدت قله‌ها در این دو نمونه افزایش یافته است که نشان دهنده‌ی افزایش بلورینگی است. قله‌های پراش متناظر با مقادیر 2θی ۳۰٫۳۹، ۳۲٫۳۰، ۳۴٫۱۹، ۳۷٫۱۴، ۴۰٫۳۷، ۵۵٫۱۷، ۵۶٫۸۲ و ۶۳٫۲۵ درجه که به‌ترتیب به صفحات پراش (۰ ۱ ۱)، (۷ ۰ ۱)، (۴ ۱ ۱)، (۳ ۰ ۲)، (۶ ۰ ۲)، (۷ ۰ ۲) ، (۷ ۱ ۲)، (۱ ۰ ۲) و (۰ ۰ ۲) مربوط می‌شوند، همخوانی دارند. الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بازپخت شده با نرم‌افزار X-pert با کارت استاندارد شماره (۱۲۰۷-ICDD#۰۲۴) مربوط به هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز مقایسه شدند که نتیجه‌ی این مقایسه نشان می‌دهد که بیشترین همخوانی مربوط به نمونه‌ی با دمای پخت حدود ۹۵۰°C است.

سپس با افزایش دما به دماهای ۱۰۰۰°C و بالاتر ساختار نمونه‌های بازپخت شده دستخوش کرنش شده و از حالت استاندارد هگزافریت استرانسیوم خارج می‌شود. لذا به نظر می‌رسد دمای ۹۵۰°C برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز مناسب باشد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از مرحله‌ی قبل، به نظر می‌رسد دماهای بازپخت بالاتر از ۹۵۰°C باعث بهبود خواص ریزساختاری نمی‌شوند. بنابراین با انتخاب دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰°C و تغییر زمان بازپخت، خواص ریزساختاری نمونه‌های هگزافریت استرانسیوم بررسی شدند. به این منظور بازپخت در دمای ۹۰۰ °C در زمان‌های، ۶ و ۷ ساعت و در دمای ۹۵۰°C با زمان‌های ۴، ۵ و ۶ ساعت تکرار شدند.



شکل ۱ منحنی DTA/TG نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



شکل ۲ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های بازپخت شده در دماهای الف) ۸۰۰، ب)۸۵۰، پ) ۹۰۰، ت) ۹۵۰ و ث) ۱۰۰۰ °C با زمان ۵ ساعت.

شکل ۳ الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌های در دمای $^{\circ}C$ ۹۰۰ در زمان‌های، ۶ و ۷ ساعت و در دمای$^{\circ}C$ ۹۵۰ با زمان-های ۴، ۵ و ۶ ساعت را نشان می‌دهد. در الگوی پراش نمونه‌ی بازپخت شده در دمای $^{\circ}C$ ۹۰۰ و زمان ۶ ساعت، قله‌هایی در 2θهای ۱۷٫۴۳، ۲۳٫۴۲، ۲۶٫۵۱ و ۴۵٫۰ مربوط به‌فاز مگنتیت (Fe_3O_4) مشاهده می‌شوند. در الگوی پراش نمونه بازپخت شده در دمای $^{\circ}C$ ۹۰۰ و زمان ۷ ساعت قله‌هایی در 2θی ۲۳٫۴۵ یک قله. وابسته به مگنتیت دیده می‌شود. الگوی پراش نمونه بازپخت شده در دمای $^{\circ}C$ ۹۵۰ و زمان ۴، ۵ و ۶ ساعت این قله‌ها حذف شده و قله‌های مشاهده شده کاملاً بر کارت استاندارد (ICDD#-۰۲۴-۱۲۰۷) برازیده‌اند. با استفاده از داده‌های الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، اطلاعات ریزساختاری شامل اندازه‌ی بردارهای شبکه a و c (رابطه‌ی ۲)، حجم سلول واحد (رابطه ۳)، چگالی پرتو ایکس (رابطه ۴)، میانگین اندازه‌ی بلورک‌ها و کرنش با رابطه‌ی ویلیامسون-هال (رابطه ۶) محاسبه شدند که نتایج حاصل در جدول ۱ آمده‌اند.

$$\frac{1}{d_{hkl}^2}=\frac{4\sin^2\theta}{\lambda^2}=\frac{4}{3}\left(\frac{h^2+hk+k^2}{a^2}\right)+\frac{l^2}{c} \quad (۲)$$

$$V_{cell}=a^2c\sin 120=0.8666a^2c \quad (۳)$$

$$d_x=\frac{ZM}{N_AV_{cell}} \quad (۴)$$

در رابطه‌ی ۴، Z تعداد واحد فرمولی در یک سلول واحد (که در این‌جا مساوی ۲ است)، M جرم مولکولی، N_A عدد آوگادرو و V_{cell} حجم سلول واحد است.

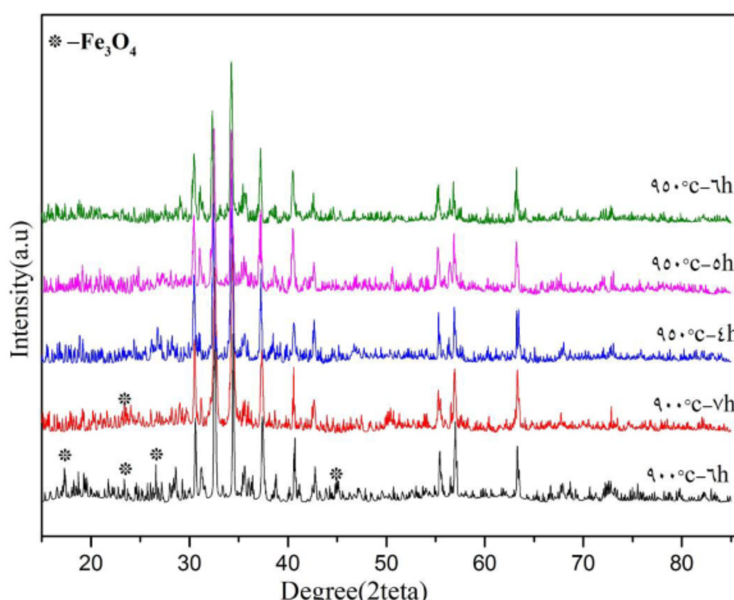
$$D=\frac{0.9\lambda}{\beta\cos\theta} \quad (۵)$$

در رابطه‌ی ۵، λ طول موج پرتو x، β نصف پهنای قله‌ی بیشینه و θ نصف زاویه‌ی قله بیشینه است.

$$\beta\cos=0.9\lambda/D+2\varepsilon\sin\theta \quad (۶)$$

در رابطه‌ی ۶، ε کرنش است.

بنابر جدول ۱، در هر دو دمای ۹۰۰ و $^{\circ}C$ ۹۵۰ با افزایش زمان بازپخت اندازه‌ی ثابت‌های شبکه و حجم سلول واحد افزایش می‌یابد. بنابر نظریه ورستگن و استیولس، با بررسی نسبت پارامترهای ($\frac{c}{a}$)، می‌توان نوع ساختار را تعیین کرد. بنابراین نظریه، اگر مقدار $\frac{c}{a}$ کمتر از ۳٫۹۸ باشد آن‌گاه ساختار موردنظر یک ساختار ششگوشی نوع M است [۱۶]. از آن‌جایی‌که مقادیر $\frac{c}{a}$ برای همه‌ی نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش کمتر از ۳٫۹۸ به‌دست آمدند، بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ساختار همه‌ی نمونه‌ها، ششگوش و از نوع M است. همچنین چگالی پرتو ایکس نمونه‌ها با افزایش زمان بازپخت و به دلیل افزایش حجم سلول واحد کاهش یافته است و با افزایش دما، اندازه‌ی میانگین بلورک‌ها افزایش یافته است در نهایت کرنش ساختار نمونه‌ها با افزایش دما و زمان بازپخت افزایش می‌یابد. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که دمای بهینه برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز $^{\circ}C$ ۹۵۰ و زمان ۴ ساعت است.



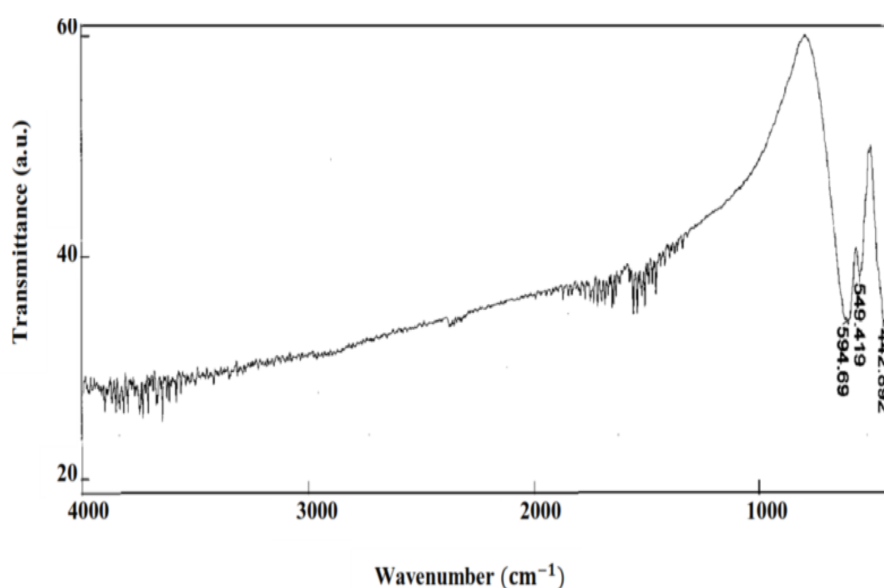
شکل ۳ الگوی پراش نمونه‌های بازپخت شده در دماهای ۹۰۰ و $^{\circ}C$ ۹۵۰ با زمان‌های مختلف.

جدول ۱ خصوصیات ریزساختاری هگزافریت استرانسیوم با دما و زمان پخت متفاوت.

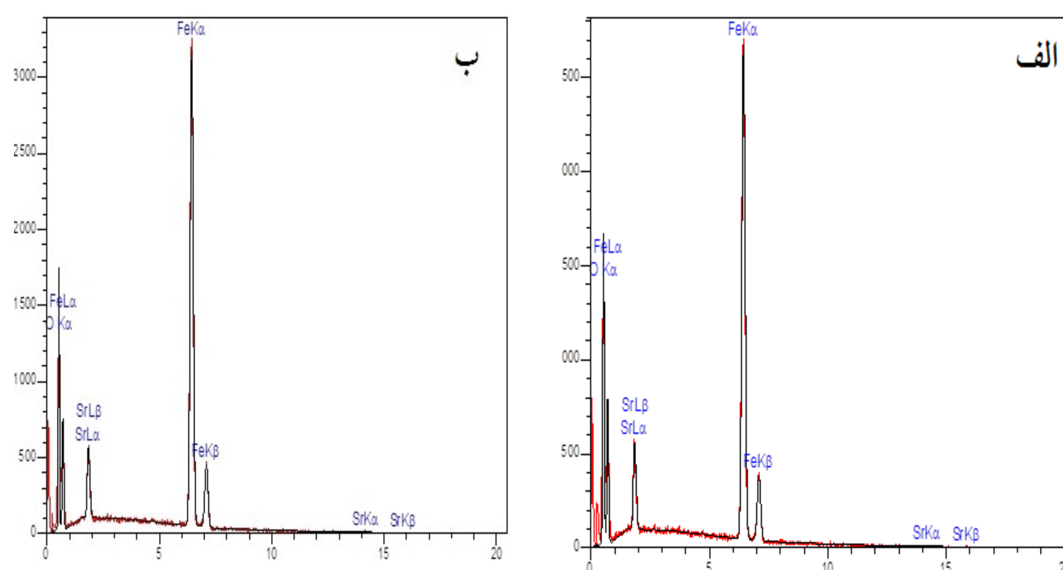
دمای بازپخت (°C)	۹۰۰	۹۰۰	۹۵۰	۹۵۰	۹۵۰
زمان بازپخت (h)	۶	۷	۴	۵	۶
a(Å)	۵/۸۷۵	۵/۸۸۳	۵/۸۷۵	۵/۸۷۵	۵/۸۹۸
c(Å)	۲۱/۹۴۴	۲۱/۱۱۴	۲۲/۸۰۷	۲۲/۹۳۰	۲۳/۰۰۲
V_{cell}(۱۰^۶ pm^3)	۶۸۷/۱۷	۶۸۸/۳۵	۶۸۷/۰۵	۶۸۷/۴۸	۶۸۹/۴۲
D(nm)	۳۲	۳۳	۲۹	۳۰	۳۴
d_x (g/cm^3)	۵/۱۳۷	۵/۱۱۲	۵/۱۴۲	۵/۱۳۷	۵/۱۱۲
ε	۰/۰۱۳	۰/۰۲۶	۰/۰۰۳	۰/۰۱۲	۰/۱۲۶

شکل ۴ بیناب FT-IR نانوذرات هگزافریت استرانسیوم در دمای°C ۹۵۰ و زمان ۵ ساعت، گستره‌ی طول موج cm^{-1} ۴۰۰۰-۴۰۰ را نشان می‌دهد [۱۷]. با توجه به شکل۴ مشاهده می‌شود طیف FT-IR نانو ذرات هگزافریت استرانسیوم شامل سه پیوند جذبی است که به پیوندهای فلز- اکسیژن در فریت‌ها وابسته‌اند. پیوندهای جذبی در گستره cm^{-1} ۵۸۰-۵۵۰ مربوط به تشکیل خوشه‌های چهاروجهی و cm^{-1} ۴۷۰-۴۳۰ متناظر با خوشه‌های هشت‌وجهی هستند که حضور پیوند کششی فلز- اکسیژن را در هگزافریت استرانسیوم تأیید می‌کند [۱۸]. سرشتی‌های جذب FT-IR نمونه‌ها نشان‌دهنده‌ی تشکیل هگزافریت استرانسیوم در دماهای فوق قرار می‌گیرند.

ترکیب عناصر موجود در نمونه‌ها با استفاده از طیف سنجی فلورسانس پرتو ایکس (XRF) بررسی شد. شکل ۵ منحنی XRFنمونه‌های بازپخت شده در دماهای۹۵۰ و ۱۰۰۰°C را نشان می‌دهد. منحنیXRF نمونه‌ها نشان دهنده‌ی وجود عناصر استرانسیوم، آهن و اکسیژن با نسبت‌های جرمی متناسب با فرمول شیمیایی هگزافریت استرانسیوم همخوانی دارد و ناخالصی در نمونه دیده نمی‌شود.



شکل ۴ بیناب FT-IR نانوذرات هگزافریت استرانسیوم بازپخت شده در دمای ۹۵۰° C و مدت ۵ ساعت.



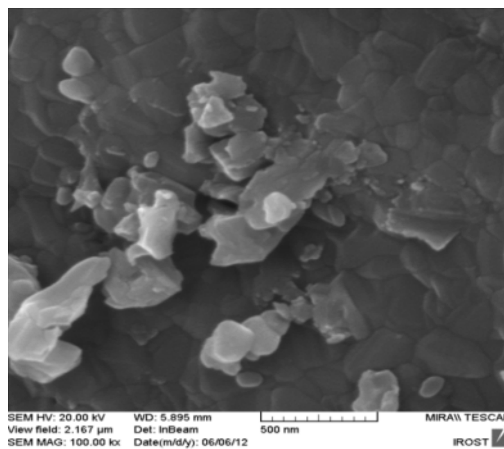
شکل ۵ منحنی XRF نمونه‌های هگزافریت استرانسیوم بازپخت شده در دماهای الف) ۹۵۰ و ب) ۱۰۰۰ °C.

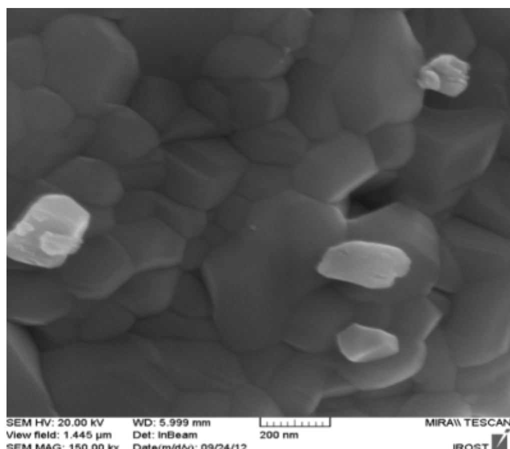
ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد. شکل ۶ تصاویر SEM نمونه‌های بازپخت شده در دماهای ۸۵۰، ۹۰۰، ۹۵۰ و ۱۰۰۰°C را نمایش می‌دهد. چنان‌که تصاویر نشان می‌دهند، با افزایش دما، اندازه و شکل نانوذرات یک‌دست شده و در دماهای ۹۰۰ و ۹۵۰°C درجه‌ی سانتی‌گراد نانوذرات عموماً دارای قاعده‌ی شش‌گوشی هستند. با افزایش دما تا بالاتر از ۹۵۰°C نانوذرات غالباً از حالت شش‌گوش خارج شده و شکل ورقه‌ای آن‌ها وضوح بیشتری پیدا می‌کند. این تغییر شکل با نتایج به‌دست آمده از الگوی پراش نمونه‌ها که نشان دهنده‌ی افزایش کرنش با افزایش دماست، همخوان است. اندازه‌ی نانوذرات براساس تصاویر SEM در گستره‌ی ۷۰ نانومتر است. چنانکه در تصاویر مشاهده می‌شود نانوذرات به‌دلیل خاصیت مغناطیسی، تجمعی هستند و هر دانه مشاهده شده در شکل از چند نانوذره با مرز مشخص تشکیل شده است.

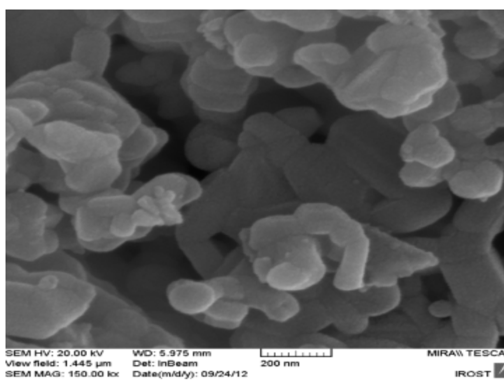
به‌منظور بررسی اثر دما و مدت پخت بر خواص مغناطیسی هگزافریت استرانسیوم، نمونه‌هایی با دمای بازپخت ۹۰۰ و ۱۰۰۰ °C به مدت ۵ ساعت و نیز دمای بازپخت ۹۵۰°C و مدت‌های ۴ و ۵ ساعت انتخاب شدند. منحنی پسماند نمونه‌ها با استفاده از مغناطیس‌سنج نمونه ارتعاشی VSM تهیه شد. شکل ۷ منحنی پسماند مغناطیسی نمونه‌ها را نشان می‌دهد. خواص مغناطیسی از قبیل مغناطش اشباعی (M_s)، پسماند مغناطیسی (M_r)، وادارندگی مغناطیسی (H_c)، پذیرفتاری مغناطیسی (χ)، نسبت چهارگوشی و مساحت حلقه‌ی پسماند با استفاده از منحنی پسماند محاسبه شدند و نتایج حاصل در جدول ۲ آورده شده‌اند. داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهند که با افزایش دمای بازپخت مغناطش اشباعی افزایش یافته و در ۹۵۰ °C به بیشینه می‌رسد و سپس با افزایش دمای بازپخت کاهش می‌یابد. همچنین کاهش زمان بازپخت در دمای °C ۹۵۰ منجر به افزایش مغناطش اشباعی شده است و تغییرات مغناطش پسماند مشابه تغییرات مغناطش اشباعی است [۱۸]. میدان وادارندگی مغناطیسی نمونه‌ها با افزایش دمای بازپخت کاهش می‌یابد. بالاتر بودن مقدار میدان وادارندگی نمونه‌ی بازپخت شده در دمای ۹۰۰ °C می‌تواند به دلیل وجود فاز هماتیت ($\alpha-Fe_2O_3$) باشد که دارای وادارندگی بالایی است. با افزایش دمای بازپخت به دلیل حذف فاز هماتیت و افزایش اندازه‌ی نانوذرات، میدان وادارندگی کاهش می‌یابد [۱۹]. چهارگوشی منحنی پسماند ($\frac{M_r}{M_s}$) برای مقادیر بزرگ‌تر از ۰٫۵ نشان می‌دهد که ذرات تک‌حوزه‌ی مغناطیسی‌اند. در این پژوهش، نسبت چهارگوشی منحنی پسماند برای نمونه‌ها در گستره ۰٫۶۴۳-۰٫۶۲۸ به دست آمد که نشان دهنده تک حوزه مغناطیسی بودن همه نمونه‌ها است [۲۰].

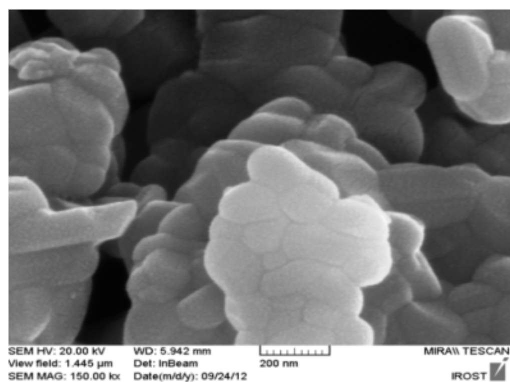
نمودار پذیرفتاری مغناطیسی (χ) بر حسب شدت میدان مغناطیسی (H)، بر اساس رابطه ($\chi = \frac{dM}{dH}$) با مشتق‌گیری از شاخه‌ی بالای منحنی پسماند شکل ۷ محاسبه شد که نتایج در شکل ۸ نمایش داده شده است. منحنی پذیرفتاری

مغناطیسی همه‌ی نمونه‌ها تنها یک قله برای مغناطش وجود دارد که با نتایج به‌دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها، مبنی بر تک‌فاز بودن نمونه‌ها همخوانی دارد. همچنین شکل۸ نشان می‌دهد که پذیرفتاری مغناطیسی نمونه‌ها با افزایش دمای بازپخت، افزایش یافته و در دمای ۱۰۰۰°C به بالاترین مقدار ($۲/۵۰×۱۰^{-۲}$) در H = ۵۵۰۷ (Oe) رسیده است.

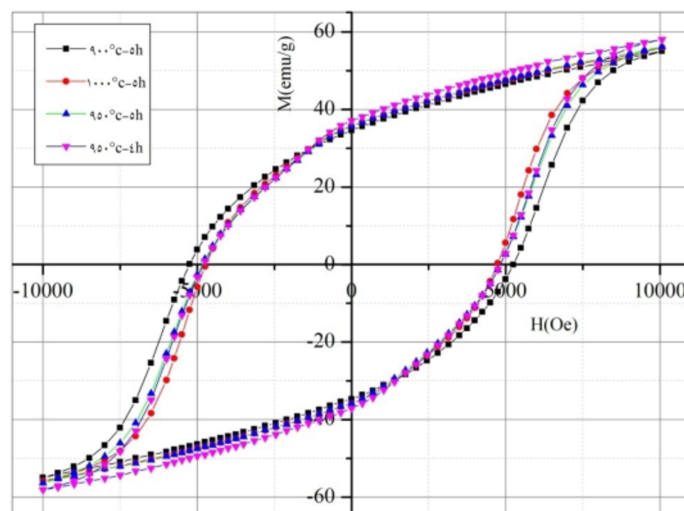








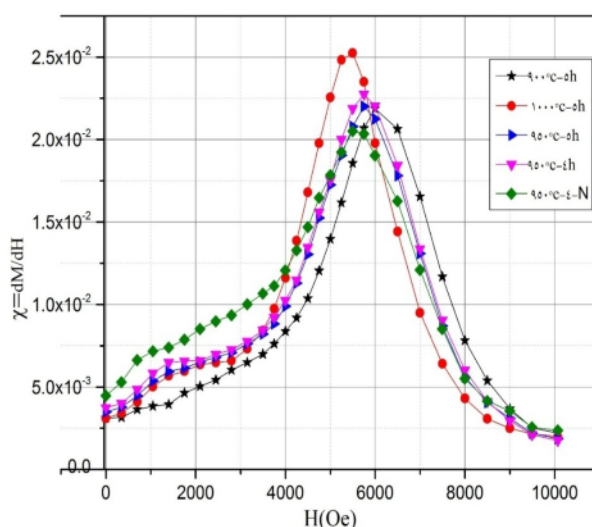
شکل ۶ تصاویر SEM نانوذرات هگزافریت استرانسیوم با دمای پخت الف) ۸۵۰، ب)۹۰۰، ج)۹۵۰ و د) C ° ۱۰۰۰ به مدت ۵ ساعت.



شکل ۷ منحنی پسماند مغناطیسی نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.

جدول ۲ خواص مغناطیسی نمونه‌های هگزافریت استرانسیوم با دما و مدت پخت متفاوت.

دمای بازپخت (°C)	۹۰۰	۹۵۰	۹۵۰	۱۰۰۰
زمان بازپخت (h)	۵	۵	۴	۵
M_s (emu/g)	۵۴/۹۸	۵۶/۰۹	۵۸/۰۳	۵۵/۹۶
M_r (emu/g)	۳۴/۵۶	۳۵/۶۷	۳۷/۰۳	۳۵/۷۲
H_c (Oe)	۵۲۵۴/۱۲	۴۸۳۷/۸۱	۴۸۰۲/۰۳	۴۷۲۳/۷۷
M_r/M_s	۰/۶۲۸	۰/۶۳۵	۰/۶۳۸	۰/۶۳۸
χ/۱۰	۲/۱۹	۲/۱۸	۲/۲۴	۲/۵۰
مساحت حلقه پسماند (A= ۱/۱۰)	۷/۹۵	۷/۵۲	۷/۷۶	۷/۲۶

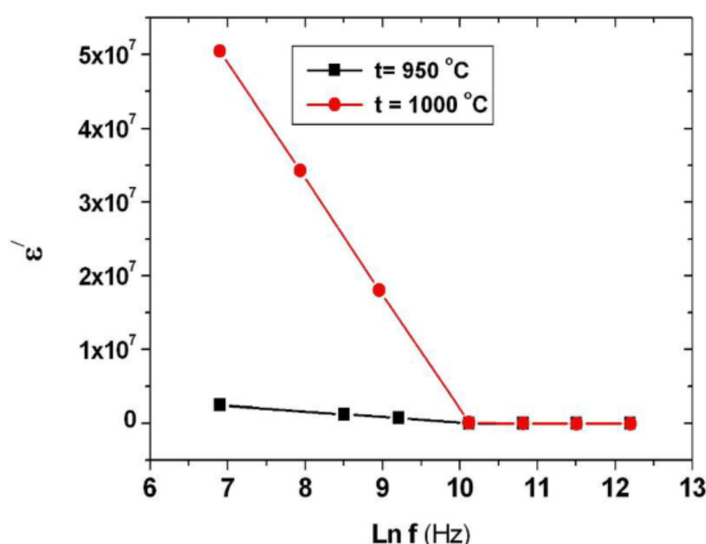


شکل ۸ نمودار پذیرفتاری مغناطیسی بر حسب شدت میدان مغناطیسی نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.

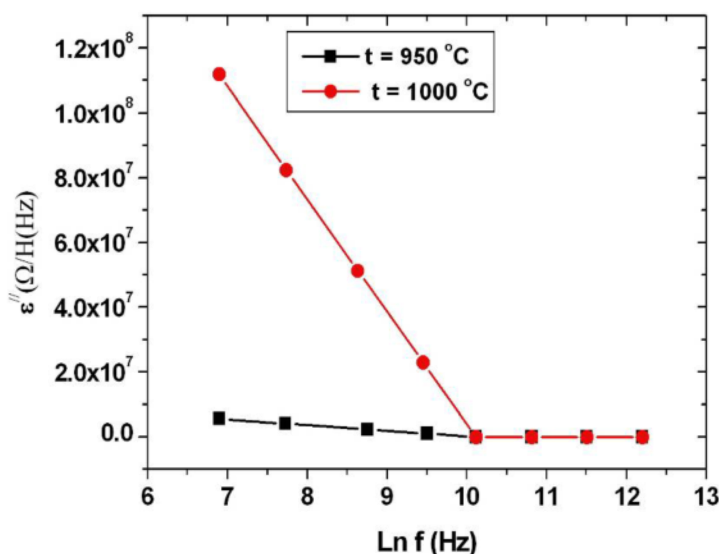
خواص دی‌الکتریکی مختلف از قبیل ثابت دی‌الکتریک، سازه‌ی اتلاف دی‌الکتریک، رسانندگی الکتریکی ac، نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب القای مغناطیسی سیم‌پیچ با استفاده از داده‌های به‌دست آمده به وسیله‌ی دستگاه LCR متر، در دمای اتاق در گستره بسامدی ۱KHz تا ۲۰۰KHz اندازه‌گیری شدند. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریک نمونه‌های تهیه شده در دماهای بازپخت ۹۵۰ و ۱۰۰۰°C به مدت ۵ ساعت در جو و با بسامدهای مختلف در شکل‌های ۹ تا ۱۳ نشان داده شده‌اند.

از شکل‌های ۹، ۱۰ و ۱۱ پیداست که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریک (ε')، اتلاف دی‌الکتریک (ε'') و رسانش الکتریکی σ_{ac} نمونه‌ها کاهش می‌یابند. آهنگ کاهش در بسامدهای پایین سریع و در بسامدهای بالا آهسته است که این روند کاهش نشان دهنده‌ی رفتار دی‌الکتریک طبیعی فریت‌هاست. رفتار دی‌الکتریک فریت‌ها را می‌توان با استفاده از مدل دو لایه‌ای ماکسول- ویگنر و نظریه‌ی کوپ تشریح کرد [۲۱، ۲۲]. بنابر مدل ماکسول- ویگنر، مواد دی‌الکتریک با ساختار ناهمگن را می‌توان شامل دانه‌هایی با رسانندگی بالا که به وسیله‌ی لایه‌های نازک مقاومتی (مرزدانه‌ها) از هم جدا شده در نظر گرفت. ولتاژ اعمالی بر نمونه بیشتر در عبور از مرزدانه‌ها کاهش یافته و یک قطبش بارفضایی در مرزدانه‌ها ایجاد می‌کند [۸]. بنابر نظریه کوپ، ثابت دی‌الکتریک در بسامدهای پایین از مرزدانه‌ها ناشی می‌شود. به‌علت مقاومت الکتریکی بالا در مرزدانه‌ها ثابت دی‌الکتریک در بسامدهای پایین دارای مقادیر بالایی است. ثابت دی‌الکتریک در بسامدهای بالاتر از دانه‌ها ناشی می‌شود. به علت مقاومت الکتریکی پایین در دانه‌ها، ثابت دی‌الکتریک در بسامدهای بالا دارای مقادیر کوچکی است. اتلاف دی‌الکتریک، بخش مهمی از کل اتلاف هسته در فریت‌های مغناطیسی است. بنابراین، برای داشتن اتلاف هسته پایین، اتلاف دی‌الکتریک کم مطلوب است. چنانکه گفته شد، این رفتار را می‌توان براساس این فرض که سازوکار قطبش دی-

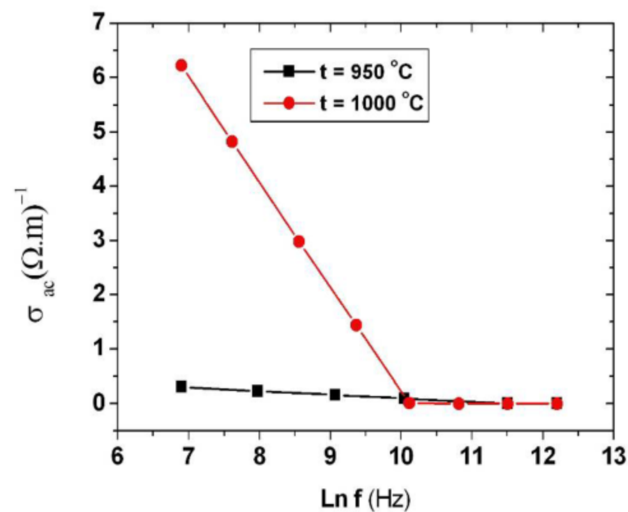
الکتریک در فریت‌ها، شبیه فرایند رسانش الکتریکی است، شرح داد. بنابر سازوکار پرش وروی، رسانش الکتریکی در فریت‌ها، به‌علت پرش الکترون‌ها بین یون‌هایی که بیش از یک حالت ظرفیت دارند و به‌طور کتره‌ای است که در جایگاه‌های شبکه توزیع شده‌اند. بنابراین، سازوکار رسانش الکتریکی در هگزافریت‌های نوع M را می‌توان براساس پرش الکترون بین یون‌های Fe^{3+} و Fe^{2+} در جایگاه‌های هشت وجهی (B)، توصیف کرد. مقاومت الکتریکی در فریت‌ها با افزایش بسامد، به‌علت افزایش انرژی جنبشی و احتمال برخورد الکترون‌ها، افزایش می‌یابد و در نتیجه رسانندگی الکتریکی کاهش می‌یابد [۲۳،۸]. نمودار نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب القای مغناطیسی سیم‌پیچ هسته، که معیاری برای تعیین تلفات هسته هستند، بر حسب بسامد و با حضور نانوذرات هگزافریت استرانسیوم ($SrFe_{12}O_{19}$) به‌عنوان هسته‌ی سیم‌پیچ، به‌ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آورده شده‌اند. چنانکه از این شکل‌ها پیداست، با توجه به اعداد مندرج برروی محور yها، نمودار نفوذپذیری مغناطیسی و ضریب القای مغناطیسی بر حسب بسامد تغییر قابل توجهی ندارد و به‌نظر می‌رسد که این کمیت‌ها تقریباً ثابت‌اند، زیرا بیشتر تغییرات نفوذپذیری و ضریب القای مغناطیسی به‌نوع فریت و ناخالصی بستگی دارد.



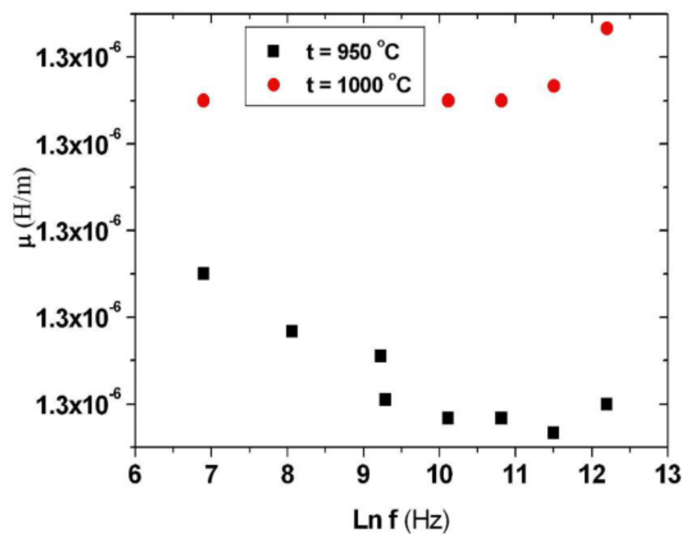
شکل ۹ نمودار ثابت دی‌الکتریک نسبی برحسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



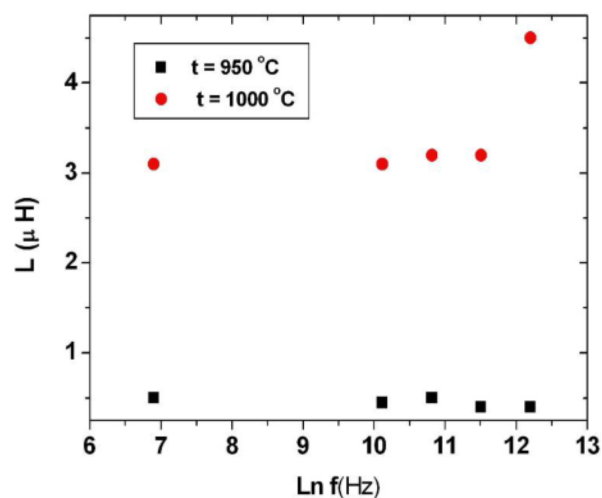
شکل ۱۰ نمودار اتلاف دی‌الکتریک برحسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



شکل ۱۱ نمودار رسانش الکتریکی برحسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



شکل ۱۲ نمودار نفوذپذیری مغناطیسی برحسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.



شکل ۱۳ نمودار ضریب القای مغناطیسی بر حسب فرکانس برای نانوذرات هگزافریت استرانسیوم.

برداشت

نخست هگزافریت استرانسیوم به روش سل- ژل احتراقی تهیه و سپس تأثیر دما و زمان بازپخت برروی ریزساختار، خواص مغناطیسی و دی‌الکتریکی آن مورد بررسی قرار گرفتند. به‌منظور تعیین دما و زمان بهینه بازپخت برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز، ابتدا نمونه‌هایی با دماهای بازپخت مختلف و سپس نمونه‌هایی با زمان‌های بازپخت متفاوت تهیه شدند. الگوی پراش نمونه‌های بازپخت شده در دمای‌های مختلف نشان می‌دهد که با افزایش دمای بازپخت، درصد همخوانی ساختار بلوری با کارت استاندارد افزایش یافته و در حدود $۹۵۰^{\circ}C$ به بیشینه می‌رسد. سپس با افزایش دما ساختار نمونه‌های بازپخت شده دستخوش کرنش شده و از حالت هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز خارج می‌شود. لذا به نظر می‌رسد دمای $۹۵۰^{\circ}C$ و مدت ۴ ساعت برای تشکیل هگزافریت استرانسیوم تک‌فاز مناسب باشد. طیف FT-IR نانوذرات هگزافریت استرانسیوم در گستره‌ی طول موج cm^{-1} ۴۰۰۰-۴۰۰ نشان می‌دهد که نانو ذرات هگزافریت استرانسیوم شامل سه پیوند جذبی است که به پیوندهای فلز- اکسیژن در فریت‌ها وابسته‌اند. پیوندهای جذبی در گستره‌ی cm^{-1} ۵۸۰-۵۵۰ مربوط به تشکیل خوشه‌های چهاروجهی و cm^{-1} ۴۷۰-۴۳۰ متناظر با خوشه‌های هشت‌وجهی هستند که حضور پیوند کششی فلز- اکسیژن را در هگزافریت استرانسیوم تأیید می‌کند. منحنی XRF نمونه‌ها، وجود عناصر استرانسیوم، آهن و اکسیژن را با نسبت‌های جرمی متناسب که با فرمول شیمیایی هگزافریت استرانسیوم همخوانی دارد نشان می‌دهد. ریخت‌شناسی نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد، چنانکه از تصاویر پیداست با افزایش دما اندازه و شکل نانوذرات یک‌دست شده و در دماهای ۹۰۰ و $^{\circ}C$ ۹۵۰ نانوذرات عموماً دارای قاعده‌ی شش‌گوشی هستند. با افزایش دما تا بالاتر از $^{\circ}C$ ۹۵۰ نانوذرات غالباً از حالت شش‌گوش خارج شده و شکل ورقه‌ای آن‌ها وضوح بیشتری پیدا می‌کند. این تغییر شکل با نتایج به دست آمده از الگوی پراش نمونه‌ها که نشان دهنده‌ی افزایش کرنش با افزایش دماست، در توافق است. اندازه‌ی نانوذرات براساس تصاویر SEM در گستره‌ی ۱۰۰-۵۰ نانومتر است. بررسی اثر دما و زمان پخت بر خواص مغناطیسی هگزافریت استرانسیوم، نشان می‌دهد. که مغناطش اشباعی و مغناطش پسماند با افزایش دما افزایش یافته و در $۹۵۰^{\circ}C$ به بیشینه می‌رسد. میدان وادارندگی نمونه‌ها با افزایش دمای بازپخت کاهش می‌یابد. در این پژوهش نسبت چهارگوشی منحنی پسماند برای نمونه‌ها در گستره‌ی ۰٫۶۴۳-۰٫۶۲۸ به دست آمده که نشان دهنده‌ی تک حوزه مغناطیسی بودن همه نمونه‌ها است. منحنی پذیرفتاری مغناطیسی همه‌ی نمونه‌ها تنها یک قله برای مغناطش وجود دارد که با نتایج به دست آمده از الگوی پراش پرتو ایکس نمونه‌ها مبنی بر تک‌فاز بودن نمونه‌ها همخوانی دارد. اندازه‌گیری‌های دی‌الکتریکی نمونه‌ها نشان می‌دهند که با افزایش بسامد، ثابت دی‌الکتریک و اتلاف دی‌الکتریک نمونه‌ها کاهش می‌یابد به‌طوری‌که کاهش در بسامدهای پایین سریع و در بسامدهای بالا آهسته است که این روند کاهش نشان دهنده‌ی رفتار دی‌الکتریک طبیعی فریت‌ها است.

مراجع

[1] Valenzuela R., *Magnetic ceramics*, (Cambridge University Press, 1994).

[2] Fang C. M., Kools F., Metselaar R., de G., and de Groot R. A., "*Magnetic and electronic properties of strontium hexaferrite $SrFe_{12}O_{19}$ from first-principles calculations*," Physics: Condensed Matter 15, (2003) 6229.

[3] Iqbal M. J., Ashiq M. N., Hernandez-Gomez P., Munoz J. M. M., and Cabrera C. T., "*Influence of annealing temperature and doping rate on the magnetic properties of Zr–Mn substituted Sr-hexaferrite nanoparticles*," Alloys and Compounds 500, (2010) 113.

[۴] مرتضی زرگر شوشتری، فرشته رنجبر، سید ابراهیم موسوی قهفرخی، "*ساخت و بررسی خواص ساختاری نانوذرات هگزافریت استرانسیوم نوع M آلائیده شده با کبالت*"، مجله

بلورشناسی و کانی شناسی ایران ، سال بیست و یکم، شماره ۱، بهار ۹۲، از صفحه ۱۶۷ تا ۱۷۸.

[5] Goldman A., *Modern Ferrite Technology*, (Springer Science+Business Media, Inc, 2nd Ed (2006).

[6] Wohlfarth E.P., *Handbook of Magnetic Materials,* Volume 3, (North-Holland Publishing Company, (1982).

[7] Hussain S., Shah N. A., Maqsood A., Ali A., Naeem M., and Ahmad Ail Seyed W., "*Characterization of Pb-doped Sr-Ferrites at Room Temperature*," Superconductivity and Novel Magnetism 24, (2011) 1245.

[8] Iqbal M. J., Ashiq M. N., Gul I. H., "*Physical, electrical and dielectric properties of Ca-substituted strontium hexaferrite ($SrFe_{12}O_{19}$) nanoparticles synthesized by co-precipitation method*," Magnetism and Magnetic Materials 322, (2010) 1720.

[9] Koohdar H. R., Seyyed Ebrahimi S. A., Yourdkhani A., Dehghan R., and Zajkaniha F., "*Optimization of hydrogen dynamic heat treatment and re-calcination forpreparation of strontium hexaferritenanocrystalline powder*", Alloys and Compounds 479, (2009) 638.

[10] Ketov SV., Yagodkin Y.D., Lebed AL, Chernopyatova Y.V., and Khlopkov K., "*Structure and magnetic properties of nanocrystalline SrFe12O19 alloy produced by high-energy ball milling and annealing*", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 300, (2006) 479.

[11] Guo Z.B., Ding W.P., Zhong W., Zhang J.R., and Du Y.W., "*Preparation and magnetic properties of $SrFe_{12}O_{19}$ particles prepared by the salt-melt method*", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 175, (1997) 333.

[12] Kazin P. E., Trusov L. A., Zaitsev D. D., and Tret'yakov Yu. D., "*GlassCrystallization Synthesis of UltrafineHexagonal M-Type Ferrites: Particle Morphologyand Magnetic Characteristics*", Russian Journal of Inorganic Chemistry 54, (2009) 2081.

[13] Harris A, IR., and Ponton CB., "*Magnetic properties of hydrothermally synthesized strontium hexaferrite as a function of synthesis conditions*", Journal of Materials Science 30, (1995) 1429.

[14] Yongfei W., Qiaoling L., Cunrui Z., and Hongxia J., "*Preparation and magnetic properties of different morphology nano- $SrFe_{12}O_{19}$ particles prepared by sol–gel method*," Alloys and Compounds 467, (2009) 284.

[15] Sachin T., Ramesh C. A., and Vijaya A, "*Reaction kinetic, magnetic and microwave absorption studies of $SrFe_{11.2}Ni_{0.8}O_{19}$ hexaferrite nanoparticles*", Journal of Materials Science: Materials in Electronics 22, (2011) 1085.

[16] Teh G. B., Wong Y. C., and Tilley R. D., "*Effect of annealing temperature on the structural, photoluminescence and magnetic properties of sol–gel derived Magnetoplumbite-type (M-type) hexagonal strontium ferrite,*" Journal of Magnetism and Magnetic Materials 323, (2011) 2318.

[17] Pavia D. L., Lampman G. M., Krize G. S., and Vyvyan J. R., "*Introduction to Spectroscopy"*, (Brooks/ColeCengage Learning, 4th ed (2009).

[18] Iqbal M. J., Ashiq M. N., Hernandez-Gomez P., Munoz J. M.,"*Magnetic, physical and electrical properties of Zr–Ni-substituted co-precipitated strontium hexaferrite nanoparticles*", Scripta Materialia 57, (2007) 1093.

[19] Sachin T., Ramesh C. A., and Agarwala V., "*Reaction kinetic, magnetic and microwave absorption studies of $SrFe_{11.2}Ni_{0.8}O_{19}$ hexaferrite nanoparticles*", Journal of Materials Science: Materials in Electronics 22, (2011) 1085.

[20] Ashiq M. N., Iqbal M. J., Najam-ul-Haq M., Hernandez G. P., Qureshi A.M., "*Synthesis, magnetic and dielectric properties of Er–Ni doped Sr-hexaferrite nanomaterials for applications in High density recording media and microwave devices*", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 324, (2012) 15.

[21] Iqbal M. J., and Farooq S., "*Enhancement of electrical resistivity of $Sr_{0.5}Ba_{0.5}Fe_{12}O_{19}$*

nanomaterials by doping with lanthanum and nickel", Materials chemistry and physics 118, (2009) 308.

[22] Iqbal M. J., Ashiq M. N., "*Physical and electrical properties of Zr–Cu substituted strontium hexaferrite nanoparticles synthesized by co-precipitation method*," Chemical Engineering Journal 136, (2008) 383.

[23] M. Anis-ur-Rehman, G. Asghar, *"Variation in structural and dielectric properties of co-precipitated nanoparticles strontium ferrites due to value of pH,"* Alloys and Compounds 509, 435-439 (2011).